

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20220928.1024.003.html>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 陈纪军, 潘子英, 郑文涛, 等. X形舵水下航行体姿态角对舵水动力特性的影响[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(1): 99–106.

CHEN J J, PAN Z Y, ZHENG W T, et al. Hydrodynamic characteristics of underwater vehicle with X-rudder configuration coupling with incidence and rudder angle[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(1): 99–106.

X形舵水下航行体姿态角对舵水动力特性的影响



扫码阅读全文

陈纪军*, 潘子英, 郑文涛, 陈默, 夏贤, 肖冬林

中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082

摘要: [目的] X形舵布局的水下航行体及操纵策略特殊, 受主体姿态角影响的X形舵舵特性与十字形舵布局的不同。[方法] 基于SUBOFF模型的X形舵布局方案, 通过数值计算分析变单舵、变单舵耦合攻角以及变单舵耦合漂角时的操纵性水动力特性, 并按照现有的船标推荐公式, 对舵角/姿态角耦合下的操纵性水动力特性进行拟合研究。[结果] 结果表明, X形舵水下航行体变单舵时, 舵与主体间存在较强的相互作用, 使得两个正交平面内的水动力(矩)存在差异; 区别于无主体姿态角时的X舵水动力特性, 耦合主体姿态角后的X舵水动力特性明显受到主体的影响。在研究的姿态角及舵角范围内, 右上舵和左下舵舵效分别随姿态角的增大而减小和增大。舵导数相对变化量值最大达16%。[结论] 研究结果可为X形舵水下航行体操控及仿真评估分析提供参考。

关键词: X舵; 水动力特性; SUBOFF; 数值模拟; 数学模型

中图分类号: U661.33; U674.76

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02537

Hydrodynamic characteristics of underwater vehicle with X-rudder configuration coupling with incidence and rudder angle

CHEN Jijun*, PAN Ziying, ZHENG Wentao, CHEN Mo, XIA Xian, XIAO Donglin

China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China

Abstract: [Objective] Due to the different arrangement and control mode of an underwater vehicle with an X-rudder configuration, the effectiveness of the after-control-surface is influenced by the angle of incidence of the underwater vehicle. [Methods] Numerical simulation is carried out on SUBOFF model with an X-rudder configuration, including variations of single rudder coupled with attack angle and drift angle respectively, along with fitting research for each case. [Results] The results show that the hydrodynamic characteristics related to rudder angle for the two orthogonal planes are different because of the significant interaction between the rudder and main body. The effectiveness of the top right rudder and lower left rudder decreases and increases with the incidence angle respectively for the studied range of incidence and rudder angle, and is also different from its straight running conditions. The relative change of the rudder derivative is up to 16% in quantity. [Conclusion] This study can provide references for the motion modeling and simulation evaluation of underwater vehicles with an X-rudder configuration.

Key words: X-rudder; hydrodynamic characteristics; SUBOFF; numerical simulation; mathematical model

0 引言

操纵性是体现水下航行体水动力性能的重要方面, 而舵操纵面的布局选型与设计是影响操纵性的重要因素。关于X形舵水下航行体的操纵性水动力特性, 国内外学者近年来开展了不少研究。

例如, MaCkay^[1]整理了1987~1988年期间有关十字形和X形舵水下航行体缩比舵段风洞模型的试验结果, 但公开的试验数据分析及结论极少。该研究中开展的压力测量试验仅针对舵操纵面, 未考虑舵段表面, 尤其是与舵附体紧邻的主体表面。Bettle^[2]采用经验公式与数值模拟相结

收稿日期: 2021-09-23

修回日期: 2021-11-08

网络首发时间: 2022-09-30 13:20

作者简介: 陈纪军, 男, 1984年生, 硕士, 高级工程师

潘子英, 男, 1979年生, 硕士, 研究员

郑文涛, 男, 1982年生, 硕士, 高级工程师

*通信作者: 陈纪军

合的方法,对不同 X 形舵面积方案的水下航行体操纵性能进行了预报,但在文中未提及姿态角对舵水动力影响的评估。Broglia 等^[9]针对不同面积的十字形和 X 形舵水下航行体在深水及近水面时水平面内非定常 PMM 运动的水动力进行了数值模拟,并对比评估了两个方案的稳定性,但未对与舵角相关的水动力特性进一步开展深入分析。国内学者也针对 X 形舵水下航行体的操纵性展开了相关研究^[4-10]。

综上所述,由 X 形舵水下航行体操纵性水动力特性研究现状可知:涉及 X 形舵布局方案的水下航行体变舵角及其姿态角耦合下的水动力特性分析不多。由于此研究是采用数学模型预报 X 形舵布局的水下航行体操纵运动的重要组成部分,因此,计及姿态角影响来开展 X 形舵水下航行体舵角水动力特性的研究具有重要意义。

本文将针对基于 SUBOFF 模型的 X 形舵布局改型方案,通过数值计算分析该布局方案下变单舵、变单舵耦合攻角和漂角时的操纵性水动力特性,按照现有的船标推荐的公式^[11],对姿态角耦合下的变舵角水动力特性进行拟合研究,用以为 X 形舵水下航行体的操控及仿真评估提供支撑。

1 数值计算简介

研究对象为基于 SUBOFF 模型的改型,如图 1 所示。其由主体、围壳及舵操纵面(4 个全动舵,由 SUBOFF 十字形方案旋转 45°得到)构成,其中不含导管及支柱。表 1 给出了主要参数^[12]。

1.1 X 舵舵角定义

图 2 给出了本文计算所涉及的舵 1 及舵 2 正舵角定义。各舵尾缘朝下偏转为正,主体攻角、漂角及其侧向力 Y 、垂向力 Z 、俯仰力矩 M 、偏航力矩 N 按照通用艇体坐标系定义^[13]。

1.2 计算策略及数据处理

本文数值研究的计算域、网格生成参数、边界条件定义等与文献[9]中的计算策略完全一致。针对 SUBOFF 的操纵性水动力计算,已将文献[9]与文献[12]的模型试验结果进行了验证,这里不再赘述。

数值计算的操纵性水动力/矩按通用艇体坐标系表达^[13],并按式(1)~式(4)无因次化。

$$Y' = Y / \frac{1}{2} \rho U^2 L_{pp}^2 \quad (1)$$

$$Z' = Z / \frac{1}{2} \rho U^2 L_{pp}^2 \quad (2)$$

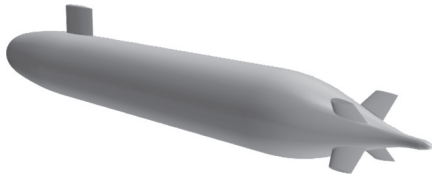


图 1 SUBOFF 潜艇模型
Fig. 1 SUBOFF submarine model

表 1 研究对象主要参数

Table 1 Main parameters of SUBOFF submarine model

参数	数值
垂线间长 L_{pp}/m	4.261
坐标原点距船纵向距离 x/m	2.013
坐标原点距基线垂向距离 z/m	0.254
舵轴距舵尾缘纵向距离 x_R/m	0.137
舵面积 S/m^2	0.025
展弦比 λ	0.720

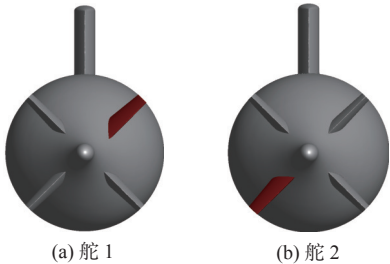


图 2 X 舵正舵角定义
Fig. 2 Definition of X-rudder angle

$$M' = M / \frac{1}{2} \rho U^2 L_{pp}^3 \quad (3)$$

$$N' = N / \frac{1}{2} \rho U^2 L_{pp}^3 \quad (4)$$

式中: ρ 为流体介质密度; U 为入口合速度。

2 计算结果及分析

2.1 变单舵操纵性水动力特性

由于舵角超过一定值后可能会出现失速现象,为了使计算研究结论具有一定的普适性,并考虑到研究对象舵展弦比较小,因此确定本次计算分析时姿态角耦合舵角 δ 最大为 10° 。

首先,针对舵 1 和舵 2 开展变单舵的操纵性水动力计算,舵角 δ 变化范围为 $-10^\circ \sim +10^\circ$, $\Delta\delta = 5^\circ$,如图 3 所示。由图可见,舵 1 和舵 2 的舵角增大时,整体操纵性水动力/矩分量呈单调变化。需要注意的是:在同一舵角下,水平面和垂直面内的水动力分量(Y' 与 Z')、矩分量(M' 与 N')并不是简单地按照 45° 分解成相同的两个分量;在 10° 舵角时,两者存在着较大差异;在舵角相同及符号相

反时,同一方向的水动力/矩分量也存在明显的差异。以舵 1 的舵角 $\delta_1 = \pm 10^\circ$ 的水动力为例,表 2

给出了各部件的操纵性水力量值对比,以进一步分析产生上述差异的原因。

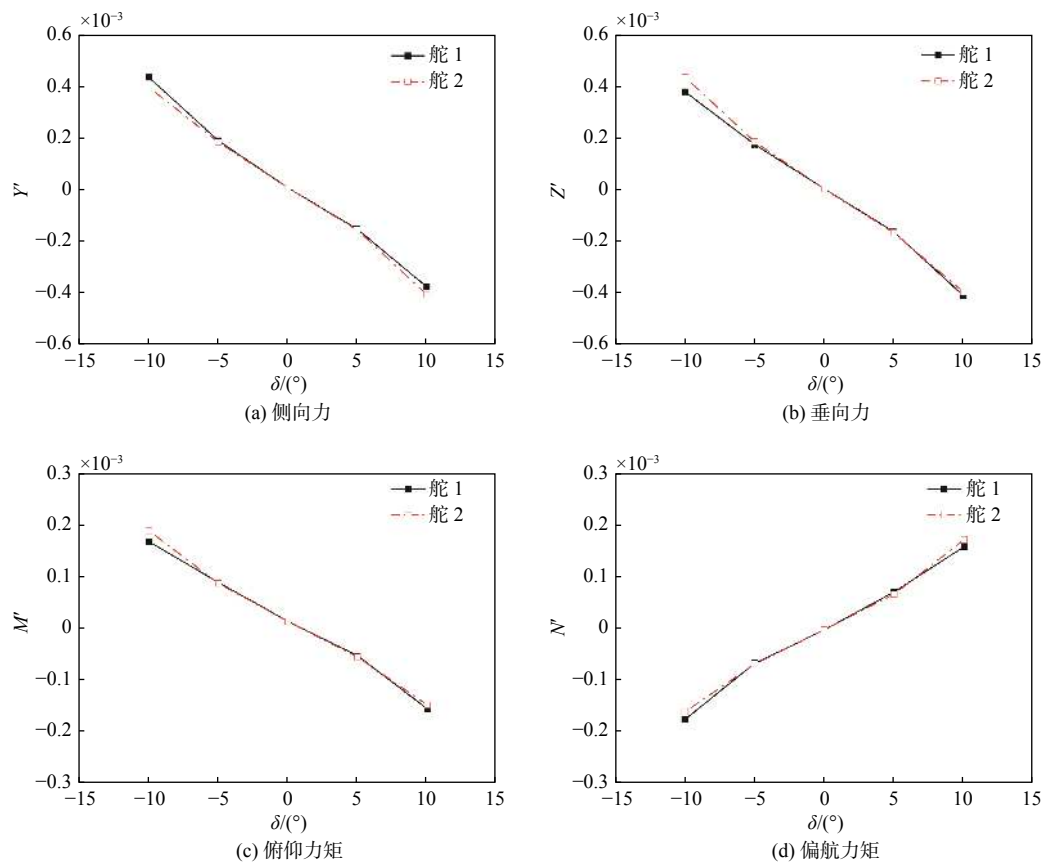


图 3 变单舵数值计算结果
Fig. 3 Computational results of single rudder variation

表 2 潜艇各部件水动力对比

Table 2 Comparison of hydrodynamic forces on each part of submarine								
$\delta_i/(^\circ)$	位置力	主体	围壳	舵1	舵2	右下舵	左上舵	合计
-10	1 000Y'	0.194	0.005	0.230	0.011	0.019	-0.032	0.427
10		-0.145	0.004	-0.216	-0.016	-0.016	0.010	-0.378
-10	1 000Z'	0.402	-0.251	0.223	0.012	-0.022	0.016	0.380
10		0.069	-0.251	-0.223	-0.007	0.024	-0.017	-0.406

考虑到受围壳影响,垂向力在各舵角为 0 时存在零升力。因此,为更好地分析对称舵角所引起的非对称力,此处仅对 $\delta_1 = \pm 10^\circ$ 的侧向力进行分析。由表 2 中加粗数值可见:当舵 1 的舵角相同但符号相反时,除舵 1 外,主体上的水动力差异较为明显,其他部件力基本不变(相较主体差了一个量级甚至更多)。图 4 分别给出了两个舵角时艏部压力系数 C_p 的云图对比。由图 4 可见,在 $\delta_1 = +10^\circ$ 时,主体位于舵 1 的吸力面侧产生了较大的低压区。由于该低压区位于舵 1 上侧,从投影面上看,该低压区在垂直面的贡献要高于水平面,即主体在水平面产生的侧向力较小;反之,在 $\delta_1 = -10^\circ$ 时,低压区位于舵 1 下侧方向,同样根据

投影,该低压区在水平面的贡献要高于垂直面,即主体在水平面产生的侧向力较大。由表 2 中统计的合力结果可见,在 $\delta_1 = -10^\circ$ 时,产生的侧向力较 $\delta_1 = +10^\circ$ 时增大了近 13%。综上,产生上述差异的原因是有舵角时舵与主体艏部间的相互作用在水平面、垂直面两个正交平面内不同所致。

2.2 计及攻角的变舵角操纵性水动力特性

为进一步计算舵 1 和舵 2 在不同攻角下的变舵角操纵性水动力数值,设攻角 α 变化范围为 $-6^\circ \sim +6^\circ$,得到如图 5 所示各工况下的垂向力、俯仰力矩结果。通过对攻角耦合舵角的操纵性水动力数据分析可知:

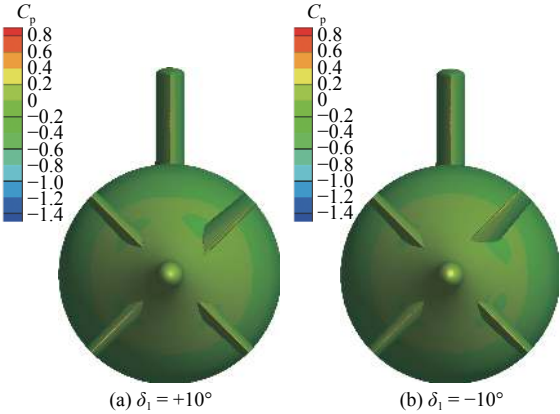


图 4 变单舵时舵部压力云图比较

Fig. 4 Comparison of pressure contours on the afterbody for single rudder variation

1) 因航行体零升力和零俯仰力矩较小,在舵 1 和舵 2 的角度均为 0° 时,其垂向力系数、俯仰力矩系数值基本上是关于攻角反对称的。

2) 攻角耦合舵 1 或舵 2 后的水动力不是反对称的,在正、负舵角时呈现出了差异。以舵 1 耦合攻角后的垂向力系数为例,如图 5(a)蓝色线框所示,此处产生差异的原因是,变舵 1 时舵与主体尾部间的相互作用在水平面、垂直面不同。更重要的是,此处还包含了航行体攻角对舵力的影响:有别于负攻角,对于正攻角,舵 1 处于主体尾

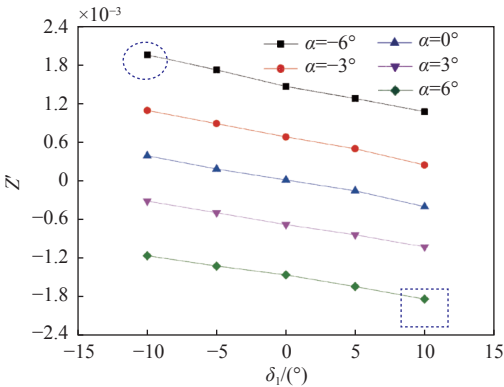
流之中;此时,舵升力特性较弱,导致了位置力(矩)较小。

3) 对比舵 1 和舵 2 耦合攻角后的水动力特性可知,两种工况也存在差异,如图 5(a)和图 5(c)中相同形状的线框所示。同样,以舵角 -10° 、攻角 -6° 时为例,变舵 1 对应的垂向力系数较大,变舵 2 对应的垂向力系数较小,这是主体尾流造成舵 1 和舵 2 升力特性存在差异所致。

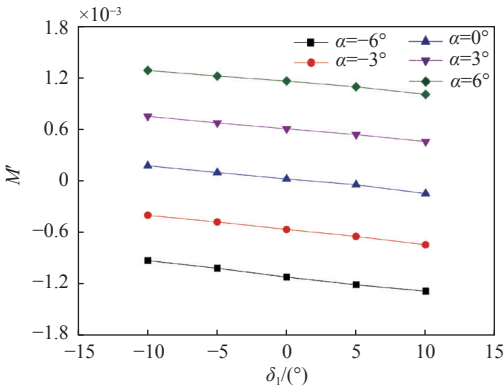
为定量评估攻角变化对舵 1 和舵 2 水动力特性的影响,分别对两者在不同攻角下的舵导数进行拟合,结果如表 3 及图 6 所示。

由表 3 及图 6 可见,攻角增大使得舵 1、舵 2 的舵效(力、矩导数)分别呈减小和增大的趋势。相比无攻角时的舵导数,其相对变化的最大量值达 15%。图 7 以固定 $\delta_1 = -10^\circ$ 为例,给出了攻角为 -6° 和 $+6^\circ$ 时的表面速度场流线图(左)及舵前方剖面的速度场云图(右)。

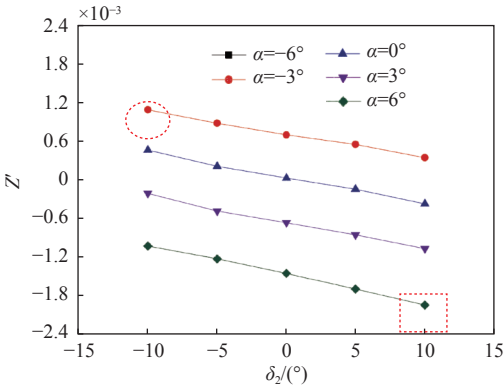
从图 7 的结果对比可见,有别于 -6° 攻角,在 $+6^\circ$ 攻角时,舵 1 被主体尾流包围,流速呈现较明显的低速状态。因此,在此尾流中系列变舵角的舵效会明显低于 -6° 攻角状态。与此类似,舵 2 只是在正攻角时处于迎流端,使得舵效高于负攻角状态。这解释了图 6 中舵 1 和舵 2 的舵效随攻角的变化呈现不同趋势的原因。



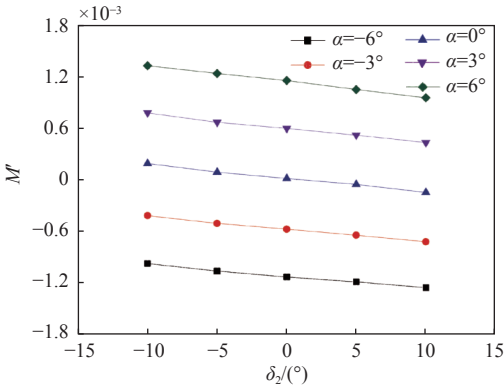
(a) 变舵 1, 垂向力系数



(b) 变舵 1, 俯仰力矩系数



(c) 变舵 2, 垂向力系数



(d) 变舵 2, 俯仰力矩系数

图 5 不同攻角下变单舵的数值计算结果

Fig. 5 Computational results of single rudder variation at different attack angles

表 3 舵 1 和舵 2 在不同攻角下的舵导数

Table 3 Rudder derivatives of rudder-1 and rudder-2 at different attack angles

舵	Z'_δ					M'_δ				
	$\alpha=-6^\circ$	$\alpha=-3^\circ$	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=3^\circ$	$\alpha=6^\circ$	$\alpha=-6^\circ$	$\alpha=-3^\circ$	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=3^\circ$	$\alpha=6^\circ$
δ_1	-2.528	-2.380	-2.197	-2.021	-1.899	-1.036	-0.979	-0.902	-0.827	-0.777
δ_2	-1.905	-2.069	-2.308	-2.373	-2.636	-0.782	-0.850	-0.933	-0.969	-1.064

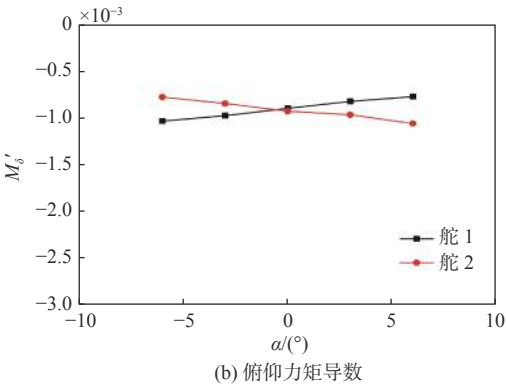
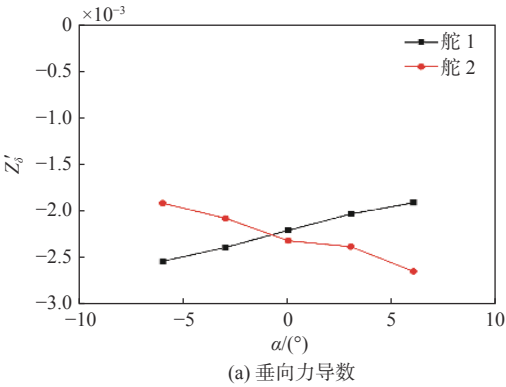


图 6 舵导数随攻角变化曲线

Fig. 6 Variation of rudder derivatives with attack angles

进一步地,为更好地对水下航行体操纵运动进行预报仿真,按照现有船标推荐公式^[11],对舵 1 和舵 2 与攻角耦合的水动力导数量值进行了回归分析,拟合公式如下:

$$F' = F'_0 + F'_w w + F'_{\delta_i} \delta_i + F'_{w\delta_i} w \delta_i \tag{5}$$

式中: $i = 1, 2$; F 代表各舵的水动力(矩)分量,即 Z, M ; w 为无因次化的垂向速度。按此线性拟合的各系数如表 4 所示。

由表 4 可见,拟合的舵 1 和舵 2 的线性导数 F'_{δ_i} 符号相同、量值相当,但攻角与舵角相关的耦合导数 $F'_{w\delta_i}$ 符号是不同的,这与图 6 中两舵舵导数随攻角变化关系不同是一致的。

2.3 计及漂角的变舵角操纵性水动力特性

与攻角计算工况类似,分别计算舵 1 和舵 2 在不同漂角下的变舵角操纵性水动力数值,设漂角 β 变化范围为 $-6^\circ \sim +6^\circ$,得到如图 8 所示各工况下的计算结果。

由图 8 可见,对于漂角与舵 1 和舵 2 耦合的操纵性水动力特性而言,其与变攻角类似,这里

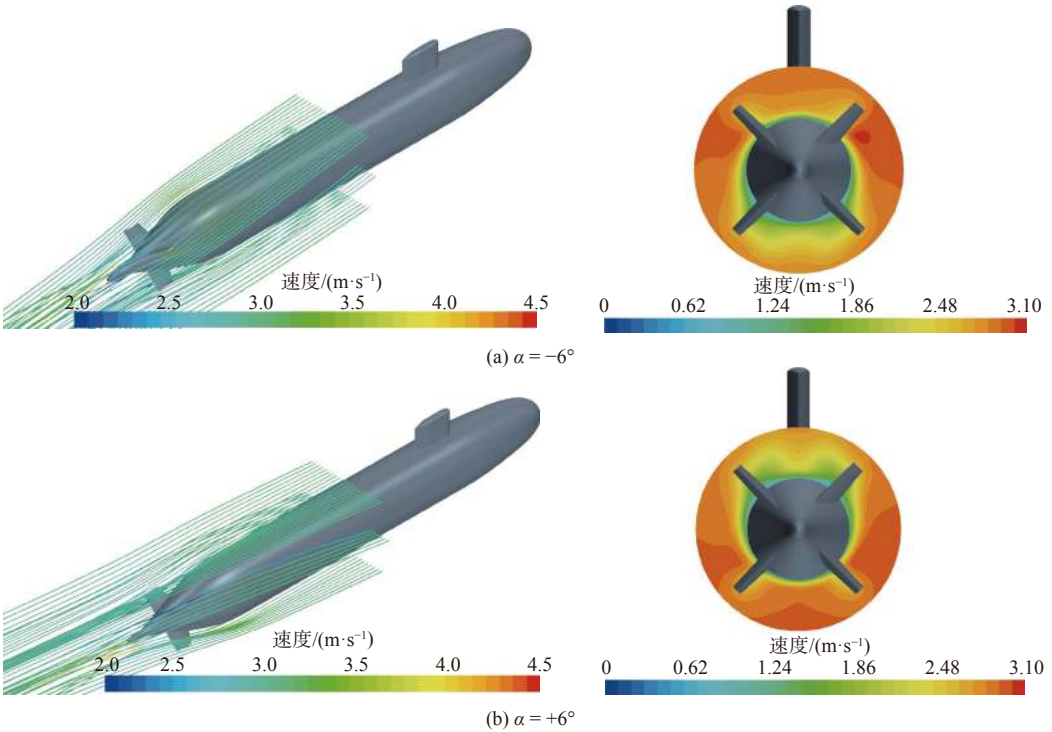


图 7 攻角±6°时舵 1 附近流线及速度场云图

Fig. 7 Streamlines and velocity contours around rudder-1 at ±6° of attack angle

表 4 变攻角耦合变舵角水动力系数整体拟合

Table 4 Fitting of hydrodynamic coefficients of single rudder coupling with attack angle

水动力系数	量值	
	Z'相关	M'相关
F'_0	-0.001×10^{-3}	0.0120×10^{-3}
F'_w	-13.950×10^{-3}	10.880×10^{-3}
F'_{δ_1}	-2.205×10^{-3}	-0.904×10^{-3}
$F'_{w\delta_1}$	3.085×10^{-3}	1.280×10^{-3}
F'_{δ_2}	-2.258×10^{-3}	-0.920×10^{-3}
$F'_{w\delta_2}$	-3.375×10^{-3}	-1.305×10^{-3}

不再赘述。

同样地，为定量评估不同漂角下舵 1 和舵 2 的舵效，分别对两者在不同漂角下的舵导数进行拟合，结果如表 5 和图 9 所示。

由表 5 和图 9 可见，随着漂角的增大，舵 1 和

舵 2 的舵效(力、矩导数)分别呈减小和增大的趋势。相比于无漂角的情况，舵效相对变化的最大量值达 16%。图 10 以 $\delta_1=-10^\circ$ 为例，给出了漂角为 -6° 和 $+6^\circ$ 时的表面速度场流线图(左)及速度场云图(右)。

从图 10 的结果对比可见，有别于 -6° 漂角，在 $+6^\circ$ 漂角时，舵 1 被主体尾流包围，流速呈现较明显的低速状态。此外，围壳根部的低速尾流也影响了舵 1 的表面流动状态，因此在此尾流中系列变舵角的舵效会明显低于负漂角状态。舵 2 与之类似，只是在正漂角时，舵 2 处于迎流端，使得舵效高于负漂角情况。这解释了图 9 中舵 1 与舵 2 的舵效存在差异的原因。

同样地，为更好地对水下航行体操纵运动进行预报仿真，对舵 1 和舵 2 与漂角耦合的水动力导数量值进行了回归分析，拟合公式如下：

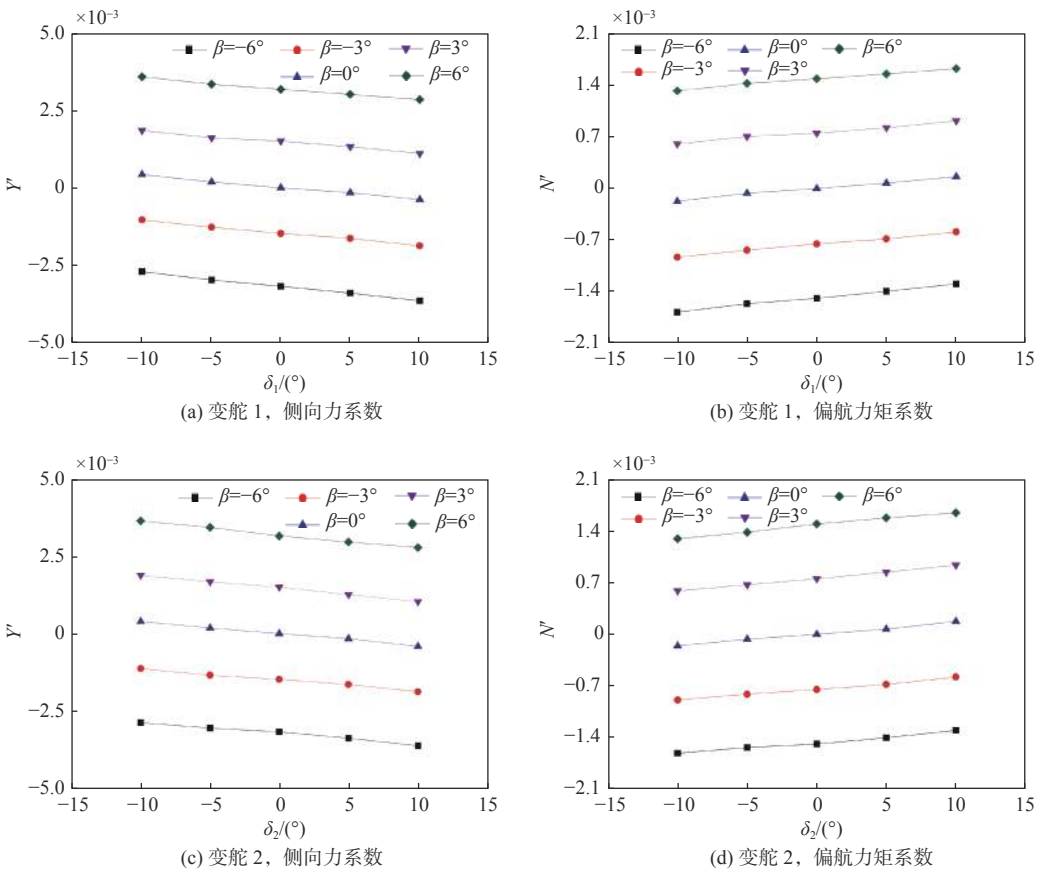


图 8 不同漂角下变单舵的数值计算结果

Fig. 8 Computational results of single rudder variation for different drift angles

表 5 舵 1 和舵 2 在不同漂角下的舵导数

Table 5 Rudder derivatives of rudder-1 and rudder-2 at different drift angles

舵	Y'_δ					N'_δ				
	$\beta = -6^\circ$	$\beta = -3^\circ$	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 3^\circ$	$\beta = 6^\circ$	$\beta = -6^\circ$	$\beta = -3^\circ$	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 3^\circ$	$\beta = 6^\circ$
δ_1	-2.624	-2.319	-2.247	-2.022	-2.058	1.071	0.959	0.922	0.851	0.842
δ_2	-2.083	-2.046	-2.225	-2.411	-2.493	0.861	0.863	0.914	0.990	1.025

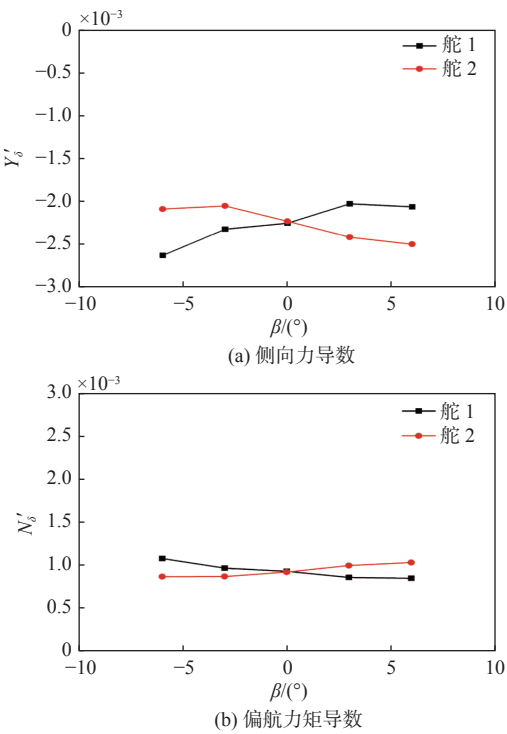


图 9 舵导数随漂角变化曲线

Fig. 9 Curves of rudder derivatives related with drift angles

$$F' = F'_0 + F'_v v + F'_{\delta_i} \delta_i + F'_{v\delta_i} v \delta_i \quad (6)$$

式中: $i=1, 2$; F 代表各舵的水动力(矩)分量, 即 Y, N ; v 为无因次化的横向速度。按此线性拟合的各系数如表 6 所示。

由表 6 可见, 舵 1 和舵 2 漂角相关舵导数符号不同, 这与图 9 中两舵舵导数随漂角变化关系不同是一致的。

表 6 变漂角耦合变舵角水动力系数整体拟合

Table 6 Fitting of hydrodynamic coefficients of single rudder coupling with drift angle

水动力系数	量值	
	Y' 相关	N' 相关
F'_0	0	0
F'_v	-29.840×10^{-3}	-14.210×10^{-3}
F'_{δ_1}	-2.254×10^{-3}	0.929×10^{-3}
$F'_{v\delta_1}$	-2.727×10^{-3}	1.082×10^{-3}
F'_{δ_2}	-2.252×10^{-3}	0.930×10^{-3}
$F'_{v\delta_1}$	2.264×10^{-3}	-0.871×10^{-3}

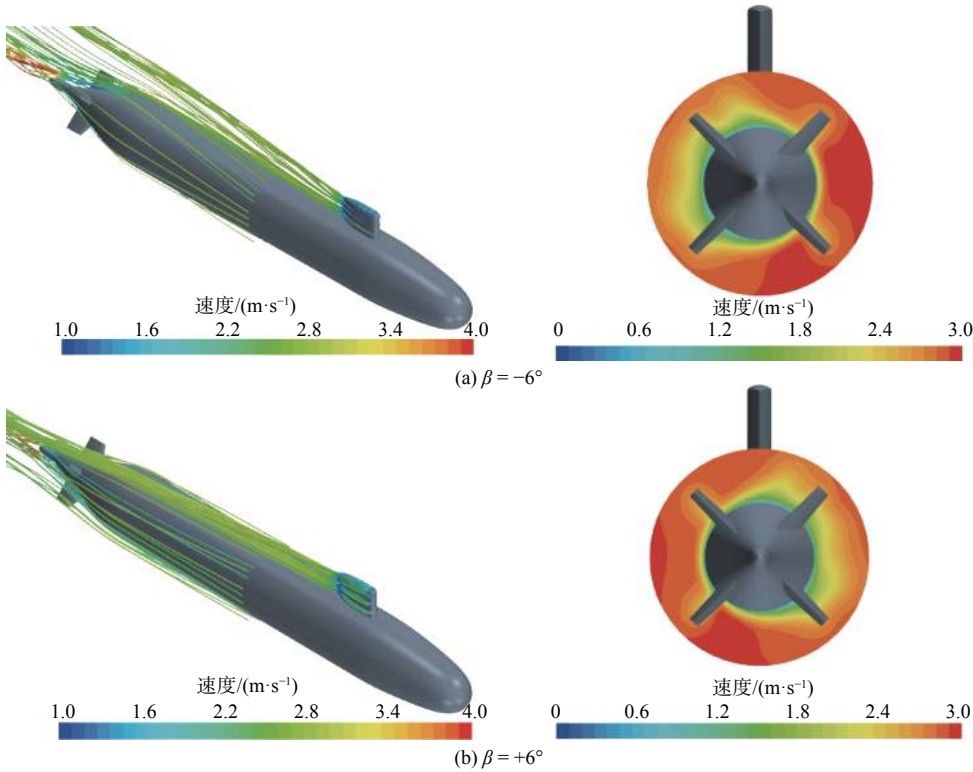


图 10 漂角 $\pm 6^\circ$ 时舵 1 附近流线及速度场云图

Fig. 10 Streamlines and velocity contours around rudder-1 at $\pm 6^\circ$ of drift angle

3 结 论

本文以基于 SUBOFF 潜艇模型的 X 形艉布局为研究方案, 采用经过验证的数值计算方法分析了变单舵、变单舵耦合攻角及变单舵耦合漂角

时的操纵性水动力特性, 并按照现有船标推荐公式, 对姿态角耦合下的变舵角水动力特性进行了拟合研究。主要研究结论如下:

1) 变单舵时, 同一舵角下水平面和垂直面内的水动力分量(Y' 与 Z')、矩分量(M' 与 N')存在差

异;当舵角角度相同及符号相反时,同一方向的水动力(矩)量值存在明显差异。上述现象在大舵角时尤为明显。经分析,上述差异是由于 X 舵与主体艏部间存在相互作用,使得在垂直面、水平面内的投影不同所导致。

2) 无姿态角时的 X 舵舵效与耦合姿态角后的 X 舵舵效差异较大。在本文研究的姿态角及舵角范围内,舵 1 和舵 2 的舵效分别随攻角/漂角的增大而呈减小和增大的趋势。无姿态角时的舵导数相对变化量值最大达 16%。经分析典型工况下的流场可知,两舵舵效呈不同趋势变化是由于不同姿态角下的主体尾流影响了舵表面流动所致。

3) 按照现有船标推荐公式拟合获得的舵 1 和舵 2 舵角、姿态角耦合的水动力(矩)导数量值与各自的线性导数相当,且舵 1 和舵 2 的耦合导数符号相反,这与主体姿态角的影响密切相关。

上述结论可为与 X 形艏水下航行体变舵角相关的操纵运动数学建模以及操纵性分析提供技术支撑,分析方法适用于 X 形艏布局的水下航行体变双舵或四舵的情形。后续工作中,建议对主体艏部及舵表面的压力测试进行分析以进一步验证结论 1)。

参考文献:

[1] MACKAY M. Wind tunnel experiments with a submarine afterbody model[R]. Dartmouth: Defence Research and Development Canada - Atlantic, 2003.

[2] BETTLE M C. Validating design methods for sizing submarine tailfins[C]//Proceedings of Warship 2014. Bath, UK:[s.n.], 2014.

[3] BROGLIA R, DUBBIOSO G, ZAGHI S, et al. Analysis of a submarine manoeuvrability by numerical PMM tests[C]//European Conference on Undersea Defence Technology (UDT2014). Liverpool, England: [s.n.], 2014.

[4] 张涛,林俊兴. 潜艇 X 形舵和十字形舵等效舵角研究 [J]. 船海工程, 2004, 26(5): 1-3.

ZHANG T, LIN J X. Study on the equivalent rudder angle between X type and cruciform rudders on submarine[J]. Ship & Ocean Engineering, 2004, 26(5): 1-3 (in Chinese).

[5] 吴军. 潜艇操纵面及操纵性能设计研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.

WU J. Study on the design of the control surface and its maneuverability for the submarine[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005 (in

Chinese).

[6] 胡坤,徐亦凡,王树宗. 潜艇 X 舵发展概况及其操纵控制特性分析 [J]. 中国造船, 2007, 48(2): 130-136.

HU K, XU Y F, WANG S Z. X rudder submarine's development history and the analysis of its manipulative characteristic[J]. Shipbuilding of China, 2007, 48(2): 130-136 (in Chinese).

[7] 黄斌,吕帮俊,彭利坤,等. X 舵潜艇掉深挽回决策与控制方法 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(4): 108-115.

HUANG B, LYU B J, PENG L K, et al. X-rudder submarine falling deep recovery strategy and control method[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(4): 108-115 (in Chinese).

[8] 王广航,吴虹明,王文晋,等. X 舵操纵的水下航行器水动力性能分析 [C]//第三十一届全国水动力学研讨会论文集(下册). 北京: 海洋出版社, 2020: 1746-1756.

WANG G H, WU H M, WANG W J, et al. The analysis of hydrodynamic performance for an underwater vehicle equipped with X-shaped rudder[C]//Proceedings of the 31th National conference on Hydrodynamics(Vol.2) . Beijing: China Ocean Press, 2020: 1746-1756 (in Chinese).

[9] 陈纪军,潘子英,彭超,等. 十字形和 X 形艏舵航行体的水动力特性对比 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(2): 8-16.

CHEN J J, PAN Z Y, PENG C, et al. Comparison of hydrodynamic characteristics of SUBOFF with cruciform and X-form rudder arrangement[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(2): 8-16 (in Chinese).

[10] 李士强,叶金铭,张海宽. X 舵与十字舵潜艇水下定深回转特性分析 [J]. 船舶力学, 2020, 24(11): 1433-1442.

LI S Q, YE J M, ZHANG H K. Analysis of underwater fixed depth turning characteristic of X-rudder and C-rudder submarine[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(11): 1433-1442 (in Chinese).

[11] 国防科学技术工业委员会. 潜艇操纵性水动力模型试验方法: CB/Z 268-2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

Commission of Science, Technology and Industry for National Defence. Method for performing captive-model test of submarine maneuverability: CB/Z 268-2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002 (in Chinese).

[12] RODDY R F. Investigation of the stability and control characteristics of several configurations of the DARPA suboff model (DTRC Model 5470) from captive-model experiments[R]. Bethesda: David Taylor Research Center, 1990.

[13] 施生达. 潜艇操纵性 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2021.

SHI S D. Submarine maneuverability[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2021 (in Chinese).